

УДК 004.932.2:535.62

Арапова С. П., Арапов С. Ю., Солодова М. С., Сергеев А. П.

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ПРИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОМ ОСВЕЩЕНИИ

Аннотация

Создан автоматизированный лабораторный источник света, в который входят светодиодные излучатели и галогенная лампа с интерференционным фильтром. Источник позволяет получать колориметрическое RGB освещение в просмотровой зоне, совпадающее с произвольным внешним по цветности и яркости. Он также снабжен гибридным излучателем, спектральный состав которого близок к стандартным осветителям серии D. Созданный источник позволяет провести прямую визуальную оценку эффекта кларификации — увеличения насыщенности цвета отражающих поверхностей в условиях колориметрического освещения.

Ключевые слова: светодиодный модуль, галогенная лампа, интерференционный фильтр, кларификация.

Arapova S. P., Arapov S. Yu., Solodova M. S., Sergeev A. P.

UrFU, Ekaterinburg, Russia

AUTOMATED LABORATORY LIGHT SOURCE FOR COLOR RENDERING RESEARCH IN THE COLORIMETRIC LIGHTING

Abstract

Automated laboratory light source created. One includes LED and halogen lamp with an interference filter. Light source allows to obtain colorimetric RGB lighting in the viewing area is coincident color and brightness with the arbitrary exterior lighting. It is also equipped with a hybrid emitter, which spectral power distribution is similar to the standard D-series illuminant. The created light source is allow to make a direct visual assessment of the effect of clarification — increase color saturation of reflecting surfaces in colorimetric lighting.

Keywords: LED module, halogen lamp, an interference filter, clarification.

© Арапова С. П., Арапов С. Ю., Солодова М. С., Сергеев А. П., 2015

Введение

С развитием технологий особую популярность получили светодиодные (СИД) источники [1–5]. Энергоэффективность и широкие возможности регулирования параметров светодиодных излучателей в ближайшее время могут привести к их доминированию в среде искусственного освещения, при этом их спектральные характеристики существенно отличаются от стандартных [6]. Особенно это касается устройств с регулируемой цветностью — колориметрических источников освещения на основе RGB СИД, для которых характерны сверхнизкие значения индекса цветопередачи (R_a) [7]. Анализ возможностей существующих систем управления цветом при работе в таких сложных условиях, а также разработка рекомендаций по их применению невозможны без создания специальных условий просмотра.

В полиграфии для оборудования просмотровых мест обычно используют люминесцентные лампы (ЛЛ) с коррелированной цветовой температурой (T_c) 5000–5500 К и высоким значением R_a (порядка 95–97). Такие источники обладают хорошими характеристиками, пригодными для решения большинства задач визуального контроля в процессе производства. Они достаточно просты в применении, поскольку для них подходят традиционные системы питания, и довольно энергоэффективны. В то же время в некоторых ситуациях [8] высокое значение R_a не означает хорошую визуальную цветопередачу. В процессе использования ЛЛ выявились определенные недостатки: постепенный сдвиг цветности из-за деградации люминофоров [9], необходимость специализированной утилизации и повышенные требования к безопасности в процессе работы с ними. Если говорить об исследовательских задачах, существенным является то, что они не позволяют регулировать цветность. Возможна лишь регулировка светового потока, и только в небольших пределах. Кроме того, они сильно отличаются от естественного освещения по спектральному распределению мощности излучения.

Широкое внедрение технологий нанесения нанопокровов позволило наладить выпуск галогенных ламп накаливания (ГЛН), снабженных интерференционными фильтрами. В современных условиях на отечественном рынке наиболее распространенными, доступными

и отвечающими основным требованиям специфического использования являются ГЛН Decostar производства Osram, которые также могут использоваться в лабораторно-исследовательских целях [10; 11]. Положительной особенностью ГЛН является непрерывность и равномерность спектра излучения, а также отсутствие деградации цветности по мере эксплуатации. Таким образом, становится возможной разработка исследовательской системы освещения, на основе современной элементной базы ГЛН и СИД, позволяющей эффективно решать обозначенный круг задач и обладающей высокой степенью автоматизации.

Целью данной работы является создание лабораторного источника освещения, позволяющего проводить визуальную оценку цвета отражающих образцов в условиях колориметрического освещения.

1. Конструкция источника освещения

Разработанный источник освещения (рис. 1) обладает граничащими друг с другом просмотровыми зонами (I, II и III), снабженными различными излучателями. В зоны помещаются используемые в исследовании объекты 1. Зоны могут быть разделены съёмными светонепроницаемыми перегородками 2.

Такая компоновка довольно традиционна [6; 7], поскольку позволяет реализовать наиболее точную методику колориметрического или квалиметрического исследования, заключающуюся в непосредственном визуальном сравнении образцов. Специфика конкретной установки зависит от поставленной цели и определяет свойства излучателей. В нашем случае в первой зоне устанавливался излучатель спектрально близкий к естественному дневному освещению 3, во второй зоне — колориметрический излучатель на основе СИД RGB 4. Следует отметить, что излучатель 3 имеет довольно сложную конструкцию, которая подробно описана в работе [12], на рис. 1 излучатели 3, 4 условно показаны как набор использованных в них компонентов. Третья просмотровая зона является внешней по отношению к источнику, излучатель 5 в ней может быть произвольным.

1. Моделирование процессов восприятия текстовой и графической информации

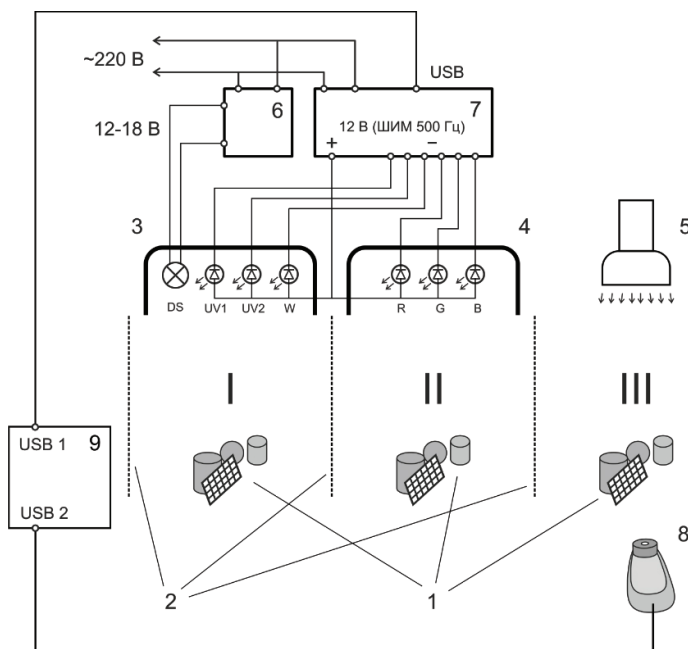


Рис. 1. Конструкция источника: 1 — предметы и контрольные шкалы; 2 — съемные светонепроницаемые перегородки; 3 — источник освещения спектрально близкого к естественному и его компоненты, ультрафиолетовые СИД UV1 и UV2, белый СИД W, DS — ГЛН Decostar 51 cool blue; 4 — колориметрический источник, СИД RGB; 5 — произвольный внешний источник; 6 — блок питания ГЛН; 7 — управляемый блок питания СИД; 8 — спектрофотометр i1Pro; 9 — управляющий компьютер

Цветности компонентов излучателей источника и соответствующие цветовые охваты представлены в виде диаграммы ху на рис. 2. Цветовой охват колориметрического излучателя дает возможность его полного колориметрического уравнивания с различными источниками света по результатам спектральных измерений. Это действие осуществляется с помощью автоматизированной системы управления. Излучатель зоны I (3 на рис. 1) используется для спектрального моделирования естественного дневного освещения в диапазоне от 5000 до 6500 К, представляющем наибольший практический интерес.

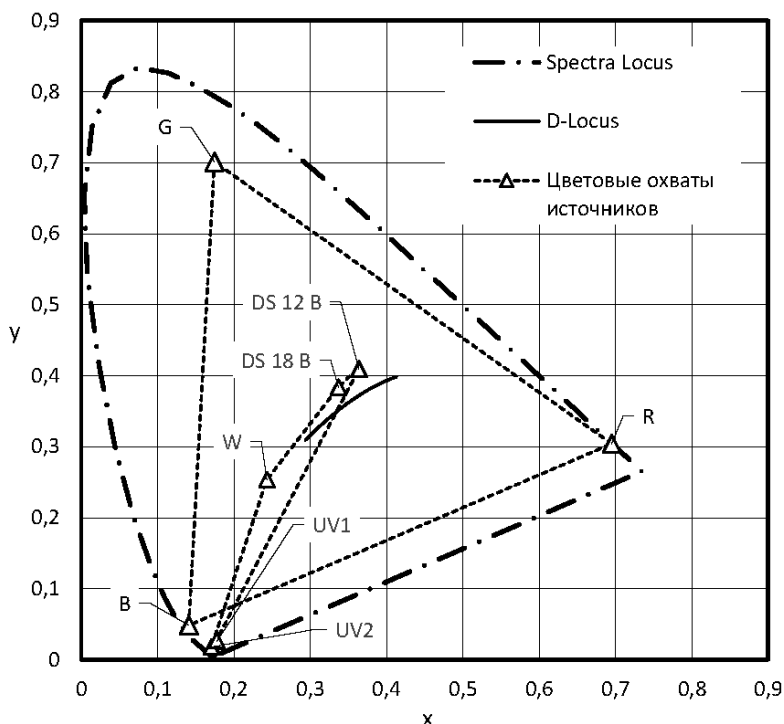


Рис. 2. Цветность компонентов комбинированного источника и цветовые охваты его излучателей

Система управления световыми потоками СИД-компонентов реализована на базе широко распространенного контроллера Arduino Uno (ATmega 328P). Подача питания на СИД осуществлялась через высокочастотные мосфеты P16NF06, управляемые от выходов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) контроллера. Частота импульсов ШИМ выходов у Arduino фиксирована и составляет примерно 500 Гц, точность регулировки скважности соответствует восьми разрядам ($1/256$ общей длительности импульса). Питание ГЛН осуществляется независимым импульсным источником с ручной регулировкой напряжения от 12 до 18 В, поскольку наиболее подходящие характеристики достигаются в перекальном режиме.

Для управления работой контроллера выбран открытый пакет ARDUINO IO для среды MATLAB, которая, в свою очередь, удобна для проведения необходимых расчетов и организации обмена с широким набором различного лабораторного оборудования.

Измерение спектрального состава полученного излучения и отдельных компонентов осуществлялось с помощью распространенного спектрофотометра i1Pro производства X-Rite в комплексе с открытым программным обеспечением Argyll CMS.

2. Система управления источником освещения

Система управления источником реализована в виде набора функций в среде MATLAB. Все расчеты производятся на основе импортированных спектральных данных из файлов, полученных с помощью команды в окне DOS: «spotread -v4 -a -H filename.sp» (Argyll CMS). При выполнении данной команды производится замер спектрального состава излучения, падающего на специальный интегрирующий рассеиватель спектрофотометра из телесного угла 2π стерadian. Для последующего полного колориметрического уравнивания необходимо обеспечить максимально идентичное положение спектрофотометра при замерах в различных просмотровых зонах источника. Измеренная таким образом спектральная мощность излучения имеет размерность мВт/нм и может быть использована для абсолютных колориметрических расчетов. Под термином «спектр» далее подразумеваются импортированный в MATLAB после измерения вектор-столбец значений спектральной мощности, в котором количество элементов равно количеству спектральных зон.

Задача колориметрического уравнивания решается на основе калибровочных данных, представляющих собой спектры излучения поочередно включаемых СИД каждой цветности R, G и B, при заранее заданном уровне скважности питающих импульсов t и отсутствии фоновой подсветки. По полученным спектрам рассчитываются калибровочная матрица излучателя C , столбцы которой содержат координаты цветов XYZ для СИД каждой цветности R, G и B:

$$C = (kA)^T \left(\frac{255}{t} B \right), \quad (1)$$

где A — матрица, столбцы которой содержат кривые сложения, k — нормировочный коэффициент для абсолютных колориметрических

расчетов (0,683 Люмен/мВт), B — матрица, столбцы которой содержат спектры СИД R, G и B.

При известных калибровочной матрице C и спектре колориметрически-моделируемого излучения S (зона III на рис. 1), представленного в виде вектора-столбца, легко рассчитать значения скажности для СИД:

$$T = 255C^{-1}(kA)^T S, \quad (2)$$

где T — вектор столбец, из трех элементов, представляющих собой значения скажности для СИД R, G и B соответственно. В случае, когда в просмотровой зоне колориметрического источника присутствует фоновое освещение, выражение (2) следует модифицировать:

$$T = 255C^{-1}(kA)^T (S - S_{\phi}), \quad (3)$$

где S_{ϕ} — вектор-столбец спектра фоновой освещенности в зоне колориметрического излучателя (II на рис. 1).

Кроме произвольных внешних источников в качестве цели для уравнивания может использоваться гибридный излучатель, создающий в своей зоне (I на рис. 1) освещенность, спектрально близкую к естественному наружному освещению. В качестве целевого спектра берется стандартный осветитель МКО серии D. Задача расчета необходимых управляющих воздействий для этого излучателя решается в варианте наилучшего спектрального приближения и затем, — наилучшего совпадения цветности. В основе оптимизационной процедуры лежит коэффициент качества аппроксимации GFC (Goodness Fitting Coefficient) подробно рассматриваемый в работах [13; 14]:

$$GFC = 1 - \frac{S_D^T S}{\sqrt{S_D^T S_D} \sqrt{S^T S}}, \quad (4)$$

где S_D — целевой спектр излучения, в качестве которого брался спектр осветителя серии D при интересующей T_u ; S — спектр гибридного источника, который образуется линейной комбинацией спектров его компонентов:

$$S = a_1 \cdot S_{UV1} + a_2 \cdot S_{UV2} + a_3 \cdot S_W + S_{DS}. \quad (5)$$

В процессе оптимизации подбирались значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 , на основе которых рассчитывались управляющие параметры

для ШИМ выходов контроллера, спектр S_{DS} лампы Decostar при этом является опорным. Полученный таким образом спектр измеряется с помощью спектрофотометра и поступает на дальнейшую обработку с целью колориметрического уравнивания. Подробное описание конструкции данного излучателя и его возможностей приведено в работе [12].

3. Полученные результаты

Разработанная система автоматического управления источником обладает возможностью колориметрического уравнивания излучений различных спектральных составов. Это дает возможность непосредственного сравнения объектов исследования, устраняя влияние хроматической адаптации наблюдателя. Такая методика обладает более высокой точностью результатов по отношению к последовательному «сравнению по памяти».

На рис. 3 в колориметрически уравненных зонах I и II, приведен пример спектров излучений по описанной процедуре. Сплошной линией показан спектр в зоне I, близкий к D50, пунктиром — спектр в зоне II после полного колориметрического уравнивания. Для сравнения приведен спектр стандартного осветителя D50.

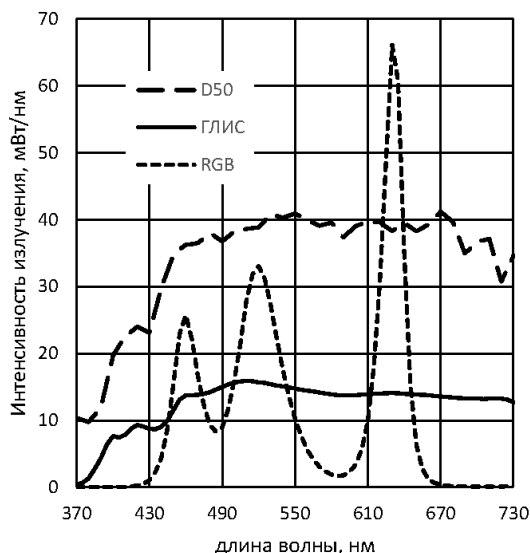


Рис. 3. Пример колориметрически уравненных спектры излучения в I и II просмотровых зонах источника

Следует отметить, что в процессе экспериментов визуально наблюдалось некоторое незначительное различие между цветностью поверхностей в просмотровых зонах, которое естественно трактуется как различие в цветности осветителей. Это может быть связано с такими причинами как индивидуальные отклонения наблюдателя от стандартных кривых сложения, ошибка квантования скважности, погрешность спектрофотометра и его расположение в просмотровых зонах. Негативный эффект может быть снижен при поднятии межзонной светонепроницаемой перегородки (2 на рис. 1) на некоторую небольшую высоту над поверхностью установки образцов. При этом размывается и исчезает четкая граница между зонами разных излучателей и субъективно воспринимаемое отличие освещенности становится существенно ниже.

Кроме уравнивания с излучателем зоны I, близким к естественному освещению, проводилось уравнивание колориметрического излучателя с различными внешними источниками. На рис. 4 приведены спектры излучателя RGB и обычной лампы накаливания. В данном эксперименте так же наблюдалось некоторое различие визуально воспринимаемой освещенности между зонами.

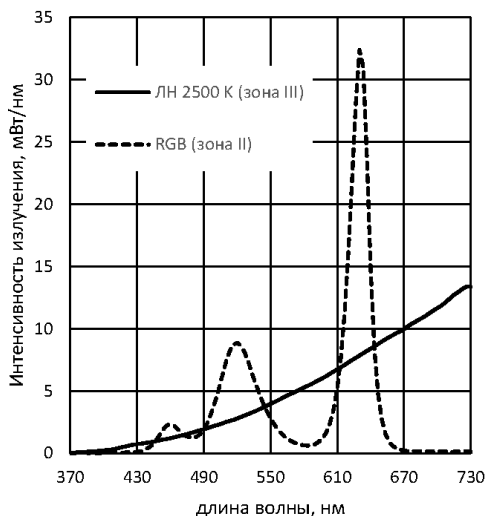


Рис. 4. Пример колориметрически уравненных спектров излучения в II и III просмотровых зонах источника

В искусственном освещении часто встречаются ЛЛ с высокой неравномерностью спектров. Это потенциально может сказаться на точности расчетов по колориметрическому уравниванию, поэтому были проведены эксперименты с компактной ЛЛ, спектрально близкой к F12. Пример спектров, полученных в результате колориметрического уравнивания приведен на рис. 5. Установлено, что режим высокого разрешения, доступный в Argyll CMS, вполне достаточен для решения поставленной задачи. Несмотря на имеющееся небольшое визуальное различие в цветности зон II и III, качество полученных результатов не хуже, чем в случае гладких спектров.

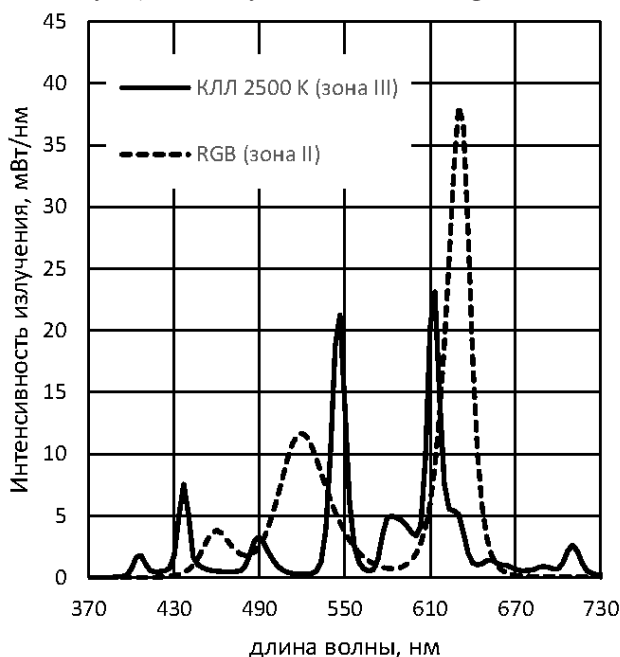


Рис. 5. Пример колориметрически уравненных спектров излучения в II и III просмотревых зонах источника

Следует отметить, что при колориметрическом уравнивании с излучателями, имеющими низкое значение $T_{\text{ц}}$ (2400–3000 К), довольно быстро исчерпывается запас светового потока красных СИД. Поскольку большинство распространенных ламп имеют невысокую $T_{\text{ц}}$,

желательно предусматривать некоторый запас по световому потоку в красном канале колориметрического излучателя.

С помощью разработанного источника были проведены предварительные исследования явления кларификации (увеличения насыщенности) цвета отражающих объектов в колориметрическом освещении. Непосредственным визуальным сравнением экспериментальных объектов установлено, что увеличение насыщенности очень значительно и эффект нуждается в тщательном изучении. В отношении печатных репродукций установлено, что кларификация может быть учтена в процессе профилирования стандартными средствами. Результаты этих исследований будут изложены в дальнейших публикациях.

Выводы

Создан лабораторный источник освещения с возможностью автоматизированного колориметрического уравнивания излучений различных спектральных составов. Устранение влияния хроматической и яркостной адаптации наблюдателя допускает непосредственное дифференциальное сравнение экспериментальных объектов в просмотровых зонах источника.

Возможности созданного источника освещения позволили провести прямую визуальную оценку эффекта кларификации — увеличения насыщенности цвета отражающих поверхностей в условиях колориметрического освещения [17–20]. Эффект оказался весьма значительным. В настоящее время с помощью созданного источника проводятся исследования данного эффекта.

В случае корректного применения существующих сегодня программных систем управления цветом открывается перспектива направленного использования явления кларификации для расширения цветового охвата печатной продукции и увеличения эффекта от ее визуального восприятия.

Список литературы

1. Белый сид и белая сид лампа: пат. 2456713 РФ: МПК H01L33/60 (2010.01) / Лоу Манэ (CN), Го Банцзюнь (CN); заявитель и патентообладатель Чжэцзян Манелюкс Лайтинг Ко., ЛТД. (CN). № 2010147626/28; заявл. 06.03.2009; опубл. 20.07.2012.

2. Осветительная установка НИСТ с регулируемым спектром для исследований в области цветопередачи / К. Даулинг, У. Дэвис,

Ю. Зонг, К. К. Миллер, Й. Оно; пер. с англ. Е. И. Розовского // Светотехника. 2009. № 5. С. 37–40.

3. Сергеев И. К. Перспективные разработки ОАО «ПО УОМЗ» в области световых приборов со светодиодами // Светотехника. 2011. № 03. С. 23–29.

4. Cheng Li, Changjun Li, Ming Ronnier Luo. Quality of LED Based Daylight Simulators // Society for Imaging Science and Technology. Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision. 2006. P. 247–250 (4).

5. Светодиодный модуль с регулируемой цветовой температурой / Бадгутдинов М. Л. [и др.] // Светотехника. 2008. № 6. С. 15–17.

6. Li C., Luo M. R., Li C. Evaluation of light sources based on visual colour rendering // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology. 2008. P. 201–204.

7. Park Y. Approach to CRI (Colour Rendering Index) for full colour RGB LED source lighting // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology. 2010. P. 371–374.

8. Schanda J. The concept of colour rendering revisited // Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision. Society for Imaging Science and Technology. 2002. P. 37–41.

9. Hunt C. E., Quintero J., Carreras J. Appearance Degradation and Chromatic Shift in Energy-Efficient Lighting Devices // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology. 2011. P. 71–75.

10. Разработка универсальной просмотровой камеры для калиметрических исследований в соответствии с ISO 3664:2009 / Тарасов Д. А. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 1. С. 27–36.

11. Qualimetric Researches of Educational Resources: Standardizing of Light Conditions in the Light Booth / Sergeev A. P. [et al.] // INTE 2014 (International Conference on New Horizons 2014), <https://int-e.net/programme.php>. INTE 2014 Paris, France. June 25–27, 2014.

12. Автоматизированный лабораторный источник освещения для колориметрических исследований / Солодова М. С. [и др.] // Сборник докладов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» / под ред. Круглов А. В. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. С. 4–12.

13. Hernández-Andrés Javier et al. Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain // JOSA A. 2001 V. 18. № 2. P. 412–420.

14. Imai Francisco et al. Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality // The First European Conference on Colour Graphics Imaging and Vision., NY, USA. 2009. P. 785–792.

15. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъемки в стационарных зонах изображения / Сыдихов А. Ш. [и др.] // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. С. 179–185.

16. Мультиспектральная фотосъемка с помощью стандартной цифровой фотокамеры / Шавкутенко Е. Н. [и др.] // Сборник докладов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» / под ред. Круглов А. В. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. С. 127–134.

17. Thornton W.A. Color-Discrimination Index // J. Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62, № 2. P. 191–194.

18. Thornton W.A. Color-Rendering Capability of Commercial Lamps // Appl. Opt. 1972. Vol. 11, № 5. P. 1078–1086.

19. Thornton W.A. Luminosity and Color-Rendering Capability of White Light // J. Opt. Soc. Am. 1971. Vol. 61, № 9. P. 1155–1163.

20. Thornton W.A. Three-Color Visual Response // J. Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62, № 3. P. 457–459.